

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
10. September 2004 (10.09.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/077142 A1(51) Internationale Patentklassifikation⁷: G02F 1/383

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/001855

(22) Internationales Anmeldedatum:
25. Februar 2004 (25.02.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

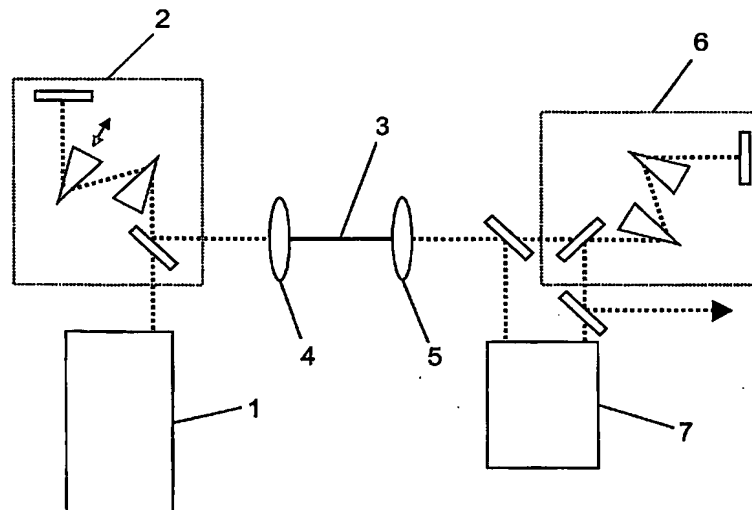
(30) Angaben zur Priorität:
103 08 249.2 25. Februar 2003 (25.02.2003) DE(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): TOPTICA PHOTONICS AG [DE/DE]; Fraunhofer-
str. 14, 82152 Planegg/Martinsried (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): TAUSER, Florian
[DE/DE]; Hiltenspergerstr. 3, 80798 München (DE).LEITENSTORFER, Alfred [DE/DE]; Unterriessstr.
4, 78465 Konstanz (DE). LISON, Frank [DE/DE];
Julius-Haerlin-Str. 32a, 82131 Gauting (DE).(74) Anwalt: SCHNEIDERS & BEHRENDT; Huestrasse 23,
Postfach 10 23 65, 44723 Bochum (DE).(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,
PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM,
ZW.(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: PRODUCTION OF TUNEABLE PICOSECOND LIGHT IMPULSES IN A VISIBLE SPECTRAL RANGE

(54) Bezeichnung: ERZEUGUNG ABSTIMMBARER PICOSEKUNDEN-LICHTIMPULSE IM SICHTBAREN SPEKTRALBE-
REICH

(57) Abstract: The invention relates to a device for the production of tuneable light impulses in a visible spectral range, comprising a laser system (LS) which emits femtosecond light impulses in the infrared spectral range, and an optical frequency converter (FC) for converting the wave lengths of the light impulses into the visible spectral range. According to the invention, the wave length of the light impulse emitted by the laser system can be tuned in order to provide said type of device which can be used as a light source for time-resolved fluorescence spectroscopy. Said device also comprises an optical stretcher which enables the duration of the impulse of the frequency converted light impulse to be increased to at least 1 ps.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse im sichtbaren Spektralbereich, mit einem Lasersystem (LS), das Femtosekunden-Lichtimpulse im infraroten Spektralbereich emittiert, und mit einem optischen Frequenzkonverter (FC) zur Konversion der Wellenlänge der Lichtimpulse in den sichtbaren Spektralbereich. Zur Bereitstellung einer derartigen Vorrichtung, die als Lichtquelle für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie einsetzbar ist, schlägt die Erfindung vor, dass die Wellenlänge der von dem Lasersystem emittierten Lichtimpulse abstimmbar ist und dass ein optischer Strecker vorgesehen ist, mittels welchem die Impulsdauer der frequenzkonvertierten Lichtimpulse auf mindestens 1 ps vergrößerbar ist.

ERZEUGUNG ABSTIMMBARER PICOSEKUNDEN LICHTIMPULSE IM SICHBAREN SPEKTRALBEREICH

- 5 Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse im sichtbaren Spektralbereich, mit einem Lasersystem, das Femtosekunden-Lichtimpulse im infraroten Spektralbereich emittiert, und mit einem optischen Frequenzkonverter zur Konversion der Wellenlängen der Lichtimpulse in den sichtbaren Spektralbereich.
- 10 Lasersysteme, die in der Lage sind, Femtosekunden-Lichtimpulse zu erzeugen, werden in der physikalischen Grundlagenforschung und auch in anderen Forschungsgebieten zunehmend angewendet. Mit derartigen Lasersystemen können schnelle physikalische, chemische und biologische Prozesse quasi in "Echtzeit" beobachtet werden. Kommerzielle Einsatzfelder für Femtosekunden-
- 15 Lichtimpulse erzeugende Lasersysteme bestehen auf den Gebieten der Materialuntersuchung und -bearbeitung, auf dem Gebiet der Medizin sowie auf dem so genannten "Life-Science"-Gebiet. Als konkrete Anwendungen sind die Multi-Photonen-Mikroskopie sowie die optische Kohärenz-Tomographie beispielhaft zu nennen.
- 20 In der jüngeren Vergangenheit hat sich außerdem die so genannte zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie zu einer wichtigen Untersuchungsmethode auf dem Gebiet der Chemie, der Biochemie, der physikalischen Chemie und auch der Halbleitertechnologie entwickelt. Bei der zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie wird in der Regel die Lebensdauer eines angeregten
- 25 Zustands eines verwendeten Fluorophors bestimmt. Dies ist die mittlere Zeit, die ein einzelnes Fluorophor-Molekül im angeregten Zustand verbringt, bevor es

unter Abstrahlung eines Fluoreszenzphotons in den Grundzustand zurückkehrt. Die Lebensdauer ist spezifisch für das jeweilige Fluorophor und seine lokale Umgebung, sodass die Fluorophor-Moleküle gewissermaßen als Sonden zur Untersuchung der interessierenden mikroskopischen Prozesse eingesetzt werden. Anhand unterschiedlicher Lebensdauern ist es beispielsweise auch
5 möglich, zwei oder mehr verschiedene Fluorophore mit überlappenden optischen Absorptions- und Emissionsspektren zu unterscheiden, wodurch die Anwendungsmöglichkeiten weiter verbessert werden. Derartige Untersuchungen kommen beispielsweise bei der automatisierten Wirkstoffsuche (HTS engl. "high
10 throughput screening") zum Einsatz.

Als so genannte Marker werden bei der zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie derzeit zumeist Fluorophore eingesetzt, deren Lebensdauer im Bereich zwischen einigen 100 ps und wenigen 100 ns. Eine kurze Lebensdauer ist in der Regel von Vorteil, da durch wiederholte Messung und Mittelung ein
15 geringes Signalrauschen erreicht werden kann. Gleichzeitig ergeben sich aus der kurzen Lebensdauer hohe Anforderungen an die Impulslänge von zur Anregung der Fluorophore eingestrahlten Lichtimpulsen. Die Impulslänge muss auf jeden Fall kurz gegenüber der Lebensdauer der Fluorophore sein. Zu beachten ist außerdem, dass die Anregungsspektren der in der Praxis in Frage
20 kommenden Fluorophore im Wesentlichen im sichtbaren Spektralbereich liegen. Die Zahl der bei bestimmten Untersuchungsobjekten für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie verwendbaren Fluorophore ist in der Regel durch das experimentelle Umfeld und durch die spezifischen Wechselwirkungen mit dem Untersuchungsobjekt stark begrenzt, sodass sich Einschränkungen hinsichtlich
25 der Wellenlänge der Lichtimpulse ergeben.

Davon ausgehend liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Lichtquelle, insbesondere für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie, bereitzustellen, die Lichtimpulse mit einer Impulsdauer im Pikosekundenbereich liefert, wobei die Wellenlänge der Lichtimpulse im Wesentlichen über den
30 gesamten sichtbaren Spektralbereich abstimmbare sein soll.

Diese Aufgabe löst die vorliegende Erfindung ausgehend von einer Vorrichtung der eingangs genannten Art dadurch, dass die Wellenlänge der von dem

Lasersystem emittierten Lichtimpulse abstimmbar ist und dass ein optischer Strecker vorgesehen ist, mittels welchem die Impulsdauer der frequenzkonvertierten Lichtimpulse auf mindestens 1 ps vergrößerbar ist.

5 Gemäß der Erfindung werden also mittels eines geeigneten Lasersystems zunächst Femtosekunden-Lichtimpulse im infraroten Spektralbereich erzeugt, die eine ausreichend hohe Impulsenergie (Größenordnung Nanojoule) haben, sodass die Wellenlänge der Lichtimpulse mittels eines Frequenzkonverters ansich bekannter Art unter Ausnutzung entsprechender nichtlinearer optischer Effekte in den gewünschten sichtbaren Spektralbereich konvertierbar ist. Die
10 frequenzkonvertierten Lichtimpulse werden dann gemäß der Erfindung mittels eines optischen Streckers auf die gewünschte Impulsdauer von bis zu 1000 ps gebracht. Für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie werden Lichtimpulse mit einer Impulsdauer im Bereich von 1 ps bis zu 1000 ps benötigt. Für die meisten Anwendungen sind Lichtimpulse mit einer Impulsdauer im Bereich
15 zwischen 10 und 100 ps erforderlich. Die Wiederholungsrate der Lichtimpulse sollte im Bereich von bis zu 250 MHz liegen.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung eignet sich selbstverständlich auch als abstimmbare Lichtquelle, die quasi-kontinuierliches Laserlicht für die normale, d.h. nicht zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie liefert.

20 Der gemäß der Erfindung eingesetzte Frequenzkonverter kann einen oder mehrere Frequenzverdoppler üblicher Art umfassen. Als Frequenzverdoppler können z. B. kommerziell erhältliche SHG-Kristalle (engl. "second harmonic generation") oder auch so genannte periodisch gepolte Kristalle oder geeignete Wellenleiterstrukturen zum Einsatz kommen.

25 Außerdem kann bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung ein optisches Frequenzfilter vorgesehen sein, das dem Frequenzkonverter entweder vor- oder nachgeschaltet ist. Das je nach Anwendungsfall verwendete nichtlineare optische Element zur Frequenzkonversion der Lichtimpulse in den sichtbaren Spektralbereich kann außerdem die Funktion des optischen Streckers und des
30 Frequenzfilters erfüllen. Aufgrund der für die Frequenzverdopplung einzuhaltenden Phasenanpassungsbedingungen erfolgt die Frequenzkonversion

in der Regel schmalbandig, was einer spektralen Filterung des frequenzkonvertierten Lichtes gleichkommt. Aufgrund der Schmalbandigkeit ergibt sich in den meisten Fällen auch eine zeitliche Streckung der Lichtimpulse.

5 In Abhängigkeit von dem verwendeten nichtlinearen optischen Element zur Frequenzkonversion muss dementsprechend bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung nicht unbedingt ein separates optisches Element vorgesehen sein, das die Funktion des optischen Streckers erfüllt.

10 Zweckmäßigerweise sollte die Wellenlänge der von dem Lasersystem emittierten Lichtimpulse in einem ausreichend großen Bereich, nach Möglichkeit wenigstens zwischen $1\text{ }\mu\text{m}$ und $2\text{ }\mu\text{m}$ abstimmbar sein, damit sich eine ausreichend große Abstimmbarkeit, nach Möglichkeit im gesamten sichtbaren Spektralbereich, für die frequenzkonvertierten Lichtimpulse ergibt. Idealerweise ist das Lasersystem so weit abstimmbar, dass durch Frequenzkonversion gemäß der Erfindung der gesamte sichtbare Spektralbereich zuzüglich des
15 daran angrenzenden ultravioletten (UV) und nahen infraroten (NIR) Spektralbereichs abgedeckt werden kann. Falls gemäß der Erfindung als Frequenzkonverter ein einfacher Frequenzverdoppler verwendet wird, ergibt sich bei einer Abstimmbarkeit der Wellenlänge der von dem Lasersystem emittierten Lichtimpulse zwischen 800 nm und $2\text{ }\mu\text{m}$ beispielsweise eine
20 spektrale Abdeckung am Ausgang der erfindungsgemäßen Vorrichtung zwischen 400 nm und $1\text{ }\mu\text{m}$, sodass nahezu der vollständige sichtbare Spektralbereich einschließlich des nahen infraroten Spektralbereichs abgedeckt ist.

Der optische Strecker der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann zweckmäßigerweise durch wenigstens ein dispersives optisches Element
25 gebildet werden, das dem Frequenzkonverter nachgeschaltet ist. Der optische Strecker kann auch mehrstufig ausgebildet sein und beispielsweise aus einem Glasstab bestehen, dem eine dispersive Glasfaser nachgeschaltet ist. In der ersten Stufe kann eine Vergrößerung der Impulsdauer der frequenzkonvertierten Lichtimpulse von ca. 100 fs auf ca. 1 ps erfolgen, während in der zweiten Stufe
30 die Impulsdauer weiter von 1 ps auf die gewünschten 10 bis 100 ps vergrößert wird. Insgesamt sollte für die zeitaufgelöste Frequenzspektroskopie die Impulsdauer der frequenzkonvertierten Lichtimpulse in dem genannten Bereich

justierbar sei. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie in der Regel eine mittlere spektrale Leistungsdichte von mehr als 1 mW pro Nanometer, vorzugsweise mehr als 10 mW pro Nanometer benötigt wird.

- 5 Gemäß der Erfindung ist ein Lasersystem erforderlich, das sowohl leistungsstarke als auch spektral variable Lichtimpulse im infraroten Spektralbereich emittiert. Dieses Lasersystem sollte, insbesondere für die Anwendung auf dem Gebiet der zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie, kostengünstig und einfach bedienbar sein.
- 10 Bisher wurden Femtosekunden-Lichtimpulse hoher Leistung im Labor üblicherweise mittels Titan-Saphir-Lasersystemen erzeugt. Diese Systeme sind nachteiligerweise sehr teuer, justageaufwendig und umständlich in der Handhabung. Auch ist die Durchstimmbarkeit des optischen Spektrums der erzeugten Lichtimpulse bei solchen Lasersystemen nicht zufrieden stellend.
- 15 Heutzutage geht man dazu über, Femtosekunden-Lichtimpulse mit Impulsenergien von einem Nanojoule und mehr mittels rein faserbasierten Lasersystemen zu erzeugen. Derartige Systeme bestehen üblicherweise aus einer gepulsten Laserlichtquelle, die Femtosekunden-Lichtimpulse im Energiebereich von 100 Pikojoule emittieren. Diese Lichtimpulse werden dann
- 20 mittels einer optisch gepumpten Verstärkerfaser verstärkt, sodass die Lichtimpulse im gewünschten Impulsenergiebereich zur Verfügung stehen.

- Beispielsweise aus der EP 1 118 904 A1 ist eine Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse vorbekannt. Die bekannte Vorrichtung arbeitet mit einer speziellen nichtlinearen optischen Faser, mittels welcher das optische
- 25 Spektrum von Femtosekunden-Lichtimpulsen, die von einer geeigneten gepulsten Laserlichtquelle geliefert werden, unter Ausnutzung solitonischer Effekte und des Raman-Effekts gezielt modifiziert werden kann. Zur Variation des Spektrums der erzeugten Lichtimpulse wird bei dem in der genannten Druckschrift beschriebenen System die Intensität des in die nichtlineare optische
- 30 Faser eingekoppelten Lichts variiert. Daraus ergibt sich unmittelbar der Nachteil, dass bei dem vorbekannten System das gewünschte optische Spektrum der

erzeugten Lichtimpulse von der Impulsenergie abhängt. Eine unabhängige Variation der Impulsenergie und der Wellenlänge der Lichtimpulse ist dementsprechend mit dem vorbekannten System nicht möglich. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass bei dem vorbekannten System die eingesetzte
5 nichtlineare optische Faser eine Länge von mehreren 10 m aufweisen muss, damit der gewünschte Raman-Effekt in ausreichendem Maße wirksam wird. Durch die lange Laufstrecke kann es zu einem unerwünschten Kohärenzverlust der erzeugten Lichtimpulse kommen.

10 Zur Vermeidung der skizzierten Nachteile kann bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung ein Lasersystem zum Einsatz kommen, das zur Erzeugung der abstimmbaren Lichtimpulse eine nichtlineare optische Faser aufweist, mittels welcher das optische Spektrum von Femtosekunden-Lichtimpulsen unter Ausnutzung rein solitonischer Effekte modifizierbar ist, wobei der nichtlinearen optischen Faser ein optischer Kompressor vorgeschaltet ist.

15 Wie sich zeigt, führen nichtlineare Prozesse in der Faser, in welche die Lichtimpulse bei dem Lasersystem der erfindungsgemäßen Vorrichtung eingekoppelt werden, dazu, dass sich in der Faser zwei separate Lichtimpulse ausbilden, deren Spektrum gegenüber demjenigen des eingekoppelten Lichtimpuls zum langwelligen bzw. kurzwelligen Spektralbereich hin verschoben
20 ist. Dabei ist die spektrale Trennung der Lichtimpulse mittels des optischen Kompressors, der der nichtlinearen optischen Faser bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung vorgeschaltet ist, einstellbar. Durch den optischen Kompressor wird das zeitliche Frequenzverhalten (engl. "chirp") der eingekoppelten Lichtimpulse gezielt beeinflusst. Das mittels der nichtlinearen optischen Faser modifizierte
25 optische Spektrum hängt dann empfindlich von dem vorgegebenen "chirp" ab, sodass die gewünschte Abstimmbarkeit der Lichtimpulse gegeben ist. Vorteilhaft ist insbesondere, dass das optische Spektrum der mittels der erfindungsgemäßen Vorrichtung erzeugten Lichtimpulse unabhängig von der Impulsenergie variiert werden kann.

30 Bei Experimenten hat sich gezeigt, dass das Lasersystem der erfindungsgemäßen Vorrichtung vorteilhafterweise mit einer sehr kurzen nichtlinearen optischen Faser mit einer Länge von nur wenigen Zentimetern zur

gewünschten Modifikation des optischen Spektrums der Lichtimpulse auskommt. Dadurch werden Kohärenzverluste der erzeugten Lichtimpulse wirksam vermieden.

Die in die nichtlineare optische Faser des Lasersystems eingekoppelten Lichtimpulse sollten eine Impulsenergie von wenigstens einem Nanojoule haben. Derartig hohe Impulsenergien sind wünschenswert, damit die solitonischen optischen Effekte zur Erzeugung der abstimmbaren Lichtimpulse innerhalb der nichtlinearen optischen Faser im erforderlichen Maße auftreten.

Sinnvollerweise sollte der optische Kompressor des Lasersystems der erfindungsgemäßen Vorrichtung verstellbar ausgebildet sein, derart, dass der zeitliche Frequenzverlauf der in die nichtlineare optische Faser eingekoppelten Lichtimpulse veränderbar ist. Dies ermöglicht es auf komfortable und einfache Weise, die erzeugten Lichtimpulse auf die gewünschten Wellenlängen abzustimmen, indem die verstellbaren Elemente des optischen Kompressors, wie beispielsweise Prismen oder optische Gitter, in geeigneter Weise justiert werden.

Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist die nichtlineare optische Faser polarisationserhaltend und dispersionsverschoben ausgebildet. Eine derartige Faser ist beispielsweise in dem Artikel von T. Okuno et al. in der Zeitschrift IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics, Bd. 5, S. 1385, 1999, beschrieben. Die erwähnten solitonischen optischen Effekte, die zur gewünschten Modifikation des Spektrums der Lichtimpulse gemäß der Erfindung führen, treten in der nichtlinearen optischen Faser auf, wenn die Wellenlänge der in die Faser eingekoppelten Lichtimpulse im Bereich der Nulldispersions-Wellenlänge der Faser liegt. Bei Experimenten wurde zur Erzeugung der abstimmbaren Lichtimpulse eine nichtlineare optische Faser eingesetzt, deren Nulldispersions-Wellenlänge im Bereich von 1,52 μm liegt.

Lichtimpulse mit einem besonders breiten optischen Spektrum können mit dem Lasersystem der erfindungsgemäßen Vorrichtung erzeugt werden, wenn die nichtlineare optische Faser einen besonders kleinen Kerndurchmesser von

5 $\leq 5 \mu\text{m}$ hat. Bei Experimenten wurde eine Faser mit einem Kerndurchmesser von $3,7 \mu\text{m}$ erfolgreich eingesetzt, wobei eine Faserlänge von nur 7 cm sich als ausreichend erwiesen hat. Damit ergibt sich ein nutzbarer Wellenlängenbereich zur Abstimmung der Lichtimpulse, der sich von etwa $1,1 \mu\text{m}$ bis $2,0 \mu\text{m}$ erstreckt.

10 Neben herkömmlichen optischen Glasfasern können gemäß der Erfindung auch mikrostrukturierte photonische Fasern als nichtlineare optische Faser zur Erzeugung der abstimmbaren Lichtimpulse verwendet werden. Derartige Fasern weisen im Bereich des Kerns eine transversale Mikrostruktur auf. Durch geeignete Anpassung der Nulldispersions-Wellenlänge sowie durch geringe Kerndurchmesser und somit hohe Nichtlinearität solcher Kristallfasern ist die Erzeugung weit abstimmbarer Lichtimpulse gemäß der Erfindung möglich.

15 Optional kann bei dem Lasersystem der erfindungsgemäßen Vorrichtung der nichtlinearen optischen Faser ein zusätzlicher optischer Kompressor nachgeschaltet sein, um am Ausgang des Lasersystems Lichtimpulse mit einer minimalen Impulsdauer zu erzielen. Bei Experimenten hat sich der Einsatz eines Prismen-Kompressors unter Verwendung von Prismen aus SF10-Glas bewährt. Damit ließen sich Impulsdauern von $\leq 25 \text{ fs}$ erzielen.

20 Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im Folgenden anhand der Figuren erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 Darstellung der erfindungsgemäßen Vorrichtung als Blockdiagramm;

Fig. 2 Lasersystem der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

25 Die in der Fig. 1 dargestellte Vorrichtung besteht aus einem Lasersystem LS, das Femtosekunden-Lichtimpulse im infraroten Spektralbereich emittiert. Diese Lichtimpulse werden einem optischen Frequenzkonverter FC zugeführt, bei welchem es sich beispielsweise um einen Frequenzverdoppler-Kristall ansich bekannter Art handeln kann. Die frequenzkonvertierten Lichtimpulse werden

einem optischen Strecker OS zugeführt, mittels welchem die Impulsdauer der frequenzkonvertierten Lichtimpulse auf mindestens 1 ps vergrößerbar ist. Dem Frequenzkonverter FC kann, je nach Bedarf, ein in der Fig. 1 nicht näher dargestelltes optisches Frequenzfilter vor- oder nachgeschaltet sein, um je nach
5 Anwendungsfall unerwünschte spektrale Anteile im optischen Spektrum der Lichtimpulse eliminieren zu können. Gemäß der Erfindung ist die Wellenlänge der von dem Lasersystem LS emittierten Lichtimpulse abstimmbar. Dabei sollte eine Abstimmbarkeit zwischen 1 μm und 2 μm , nach Möglichkeit sogar zwischen 800 nm und 2 μm , gewährleistet sein, damit am Ausgang der in der Fig. 1
10 dargestellten Vorrichtung Lichtimpulse zur Verfügung stehen, die im Wesentlichen über den gesamten sichtbaren Spektralbereich abstimmbar sind. Bei dem optischen Strecker OS kann es sich um ein beliebiges dispersives optisches Element, wie beispielsweise einen Glasstab oder eine optische Faser mit geeigneter Dispersion oder um einen mehrstufigen Aufbau aus solchen
15 Elementen, handeln.

Die Fig. 2 zeigt schematisch den Aufbau des Lasersystems LS der in der Fig. 1 dargestellten Vorrichtung. Dabei ist eine gepulste Laserlichtquelle 1 vorgesehen, welche Femtosekunden-Lichtimpulse mit einer Impulsenergie von mehr als einem Nanojoule emittiert. Bei der Laserlichtquelle 1 kann es sich
20 vorteilhafterweise um ein vollständig faserbasiertes System handeln, das aus einem kommerziell erhältlichen gepulsten Faserlaser und einer diesem nachgeschalteten optischen gepumpten Verstärkerfaser zusammengesetzt ist. Der Einsatz üblicher Freistrahlaser als Laserlichtquelle 1 ist aber auch möglich. Der zeitliche Frequenzverlauf der von der Laserlichtquelle 1 emittierten
25 Lichtimpulse wird mittels eines Prismenkompressors 2 gezielt vorgegeben. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel wird zu diesem Zweck die Prismenanordnung von den Lichtimpulsen zweifach durchlaufen. Durch den Doppelpfeil ist angedeutet, dass eines der Prismen des Kompressors verstellbar ist, um dadurch gemäß der Erfindung die erzeugten Lichtimpulse abstimmen zu
30 können. Dem Prismenkompressor 2 ist eine nichtlineare dispersionsverschobene und polarisationserhaltende optische Faser 3 nachgeschaltet, in welche das Licht mittels einer Linse 4 eingekoppelt wird. Die in die Faser 3 eingekoppelten Lichtimpulse haben eine Wellenlänge, die der Nulldispersions-Wellenlänge der optischen Faser 3 im Wesentlichen entspricht. Aufgrund in der

Faser 3 auftretender nichtlinearer solitonischer Effekte wird das optische Spektrum der Lichtimpulse stark modifiziert. Die aus der optischen Faser 3 austretenden Lichtimpulse, die mittels einer weiteren Linse 5 ausgekoppelt werden, haben ein optisches Spektrum, das empfindlich von dem mittels des Kompressors 2 vorgegebenen "chirp" abhängt. Durch Verstellung des entsprechenden Prismas in dem Kompressor 2 können die aus der Faser 3 austretenden Lichtimpulse im infraroten Wellenlängenbereich zwischen 1,1 μm und 2,0 μm verstellt werden. Wie oben beschrieben, weist das optische Spektrum der Lichtimpulse am Ausgang der Faser 3 zwei separate Komponenten auf, die gegenüber der Wellenlänge des eingekoppelten Lichtimpulses zum langwelligen bzw. kurzwelligen Spektralbereich hin verschoben sind. Eine verstellbare spektrale Trennung der beiden Komponenten von mehr als 100 THz ist mit dem dargestellten Aufbau realisierbar. Auch wenn gemäß der Erfindung eine kurze nichtlineare optische Faser 3, die eine Länge von ≤ 10 cm haben kann, ausreichend ist, kommt es zu einem dispersiven Auseinanderlaufen der Lichtimpulse innerhalb der Faser 3. Dies kann durch einen zusätzlichen Prismenkompressor 6 kompensiert werden. Bei der Verwendung von SF10-Glasprismen wurden mit dem in der Zeichnung dargestellten Aufbau abstimmbare Lichtimpulse mit einer Impulsdauer von ≤ 25 fs realisiert. Zur Charakterisierung der Lichtimpulse ist ein FROG-Aufbau oder ein Spektrometer 7 vorgesehen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass zur gezielten Einstellung des "chirps" der in die Faser 3 eingekoppelten Lichtimpulse statt des Prismenkompressors 2 auch andere dispersive optische Komponenten eingesetzt werden können, wie beispielsweise Gitterkompressoren, so genannte "gechirpte" Spiegel, Faser-Bragg-Gitter, zusätzliche dispersive optische Wegstrecken usw.

- Ansprüche -

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse im sichtbaren Spektralbereich, mit einem Lasersystem (LS), das
5 Femtosekunden-Lichtimpulse im infraroten Spektralbereich emittiert, und mit einem optischen Frequenzkonverter (FC) zur Konversion der Wellenlänge der Lichtimpulse in den sichtbaren Spektralbereich, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
10 dass die Wellenlänge der von dem Lasersystem (LS) emittierten Lichtimpulse abstimmbar ist und dass ein optischer Strecker (OS) vorgesehen ist, mittels welchem die Impulsdauer der frequenzkonvertierten Lichtimpulse auf mindestens 1 ps vergrößerbar ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Frequenzkonverter (FC) einen oder mehrere Frequenzverdoppler umfasst.
- 15 3. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch wenigstens ein optisches Frequenzfilter, das dem Frequenzkonverter (FC) entweder vor- oder nachgeschaltet ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wellenlänge der von dem Lasersystem (LS) emittierten Lichtimpulse wenigstens
20 im Bereich zwischen 1 μm und 2 μm , vorzugsweise zwischen 800 nm und 2 μm , abstimmbar ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Strecker (OS) durch wenigstens ein dispersives optisches Element gebildet wird, das dem Frequenzkonverter (FC) nachgeschaltet ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Lasersystem zur Erzeugung der abstimmbaren Lichtimpulse eine nichtlineare optische Faser (3) aufweist, mittels welcher das optische Spektrum von Femtosekunden-Lichtimpulsen unter Ausnutzung solitonischer Effekte modifizierbar ist, wobei der nichtlinearen optischen Faser (3) ein optischer Kompressor (2) vorgeschaltet ist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die in die nichtlineare optische Faser (3) eingekoppelten Lichtimpulse eine Impulsenergie von wenigstens einem Nanojoule haben.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Kompressor (2) verstellbar ausgebildet ist, derart, dass der zeitliche Frequenzverlauf der in die nichtlineare optische Faser (3) eingekoppelten Lichtimpulse veränderbar ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die nichtlineare optische Faser (3) polarisationserhaltend und/oder dispersionsverschoben ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die nichtlineare optische Faser (3) einen Kerndurchmesser von weniger als fünf Mikrometern hat.

11. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die nichtlineare optische Faser (3) als mikrostrukturierte photonische Faser ausgebildet ist.

12. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Länge der nichtlinearen optischen Faser (3) weniger als einen Meter beträgt.

13. Vorrichtung nach Anspruch 6, gekennzeichnet durch einen zusätzlichen optischen Kompressor (6), der der nichtlinearen optischen Faser (3) nachgeschaltet ist.

14. Verwendung einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 für die Mikroskopie, die konfokale Mikroskopie, die Fluoreszenzspektroskopie oder die automatisierte Wirkstoffsuche.

1/1

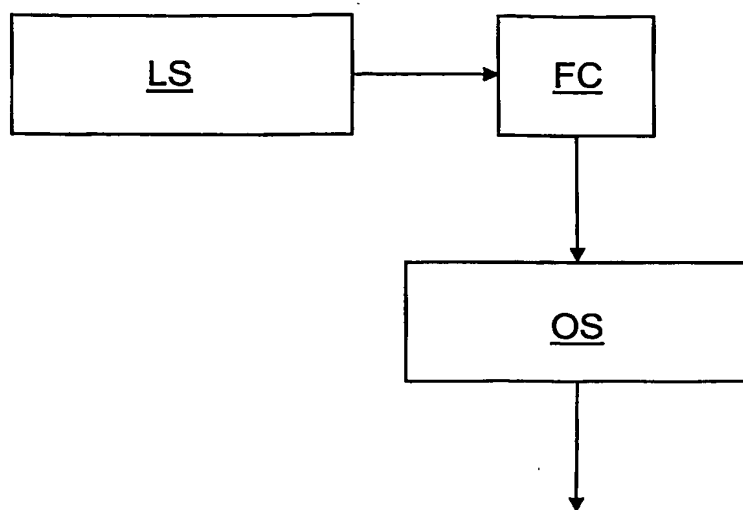


Fig. 1

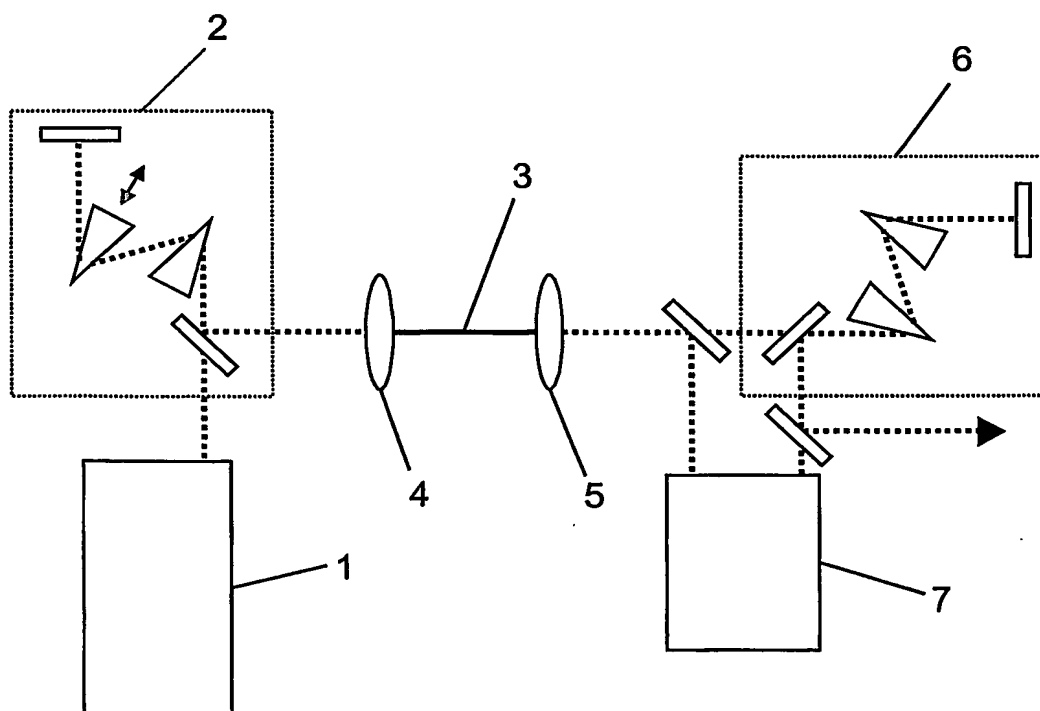


Fig. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2004/001855

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G02F1/383

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G02F H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	HERRMANN J ET AL: "Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers" PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 88, no. 17, 29 March 2002 (2002-03-29), pages 173901-1-173901-4, XP002290713 ISSN: 0031-9007 Seite 173901-2 Seite 173901-3, linke Spalte figures 1,2 ----- -/--	1-14

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☐ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *Z* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

30 July 2004

Date of mailing of the international search report

12/08/2004

Name and mailing address of the ISA
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Hauser, M

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/001855

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>HUSAKOU A V ET AL: "Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers" PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 87, no. 20, 12 November 2001 (2001-11-12), pages 203901-1-203901-4, XP002290714 ISSN: 0031-9007 Seite 203901-2 figure 2</p>	1-14
A	<p>RAOULT F ET AL: "Efficient generation of narrow-bandwidth picosecond pulses by frequency doubling of femtosecond chirped pulses" OPTICS LETTERS, vol. 23, no. 14, 15 July 1998 (1998-07-15), pages 1117-1119, XP002290715 ISSN: 0146-9592 page 1117, left-hand column page 1118, right-hand column page 1119</p>	1-14
T	<p>TAUSER F, ADLER F, LEITENSTORFER A: "Widely tunable sub-30-fs pulses from a compact erbium-doped fiber source" OPTICS LETTERS, vol. 29, no. 5, 1 March 2004 (2004-03-01), pages 516-518, XP002290716 the whole document</p>	1-14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/001855

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 G02F1/383

Nach der internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 G02F H01S

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	HERRMANN J ET AL: "Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers" PHYSICAL REVIEW LETTERS, Bd. 88, Nr. 17, 29. März 2002 (2002-03-29), Seiten 173901-1-173901-4, XP002290713 ISSN: 0031-9007 Seite 173901-2 Seite 173901-3, linke Spalte Abbildungen 1,2 ----- -/-	1-14



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

G Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

30. Juli 2004

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

12/08/2004

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Hauser, M

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	HUSAKOU A V ET AL: "Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers" PHYSICAL REVIEW LETTERS, Bd. 87, Nr. 20, 12. November 2001 (2001-11-12), Seiten 203901-1-203901-4, XP002290714 ISSN: 0031-9007 Seite 203901-2 Abbildung 2	1-14
A	RAOULT F ET AL: "Efficient generation of narrow-bandwidth picosecond pulses by frequency doubling of femtosecond chirped pulses" OPTICS LETTERS, Bd. 23, Nr. 14, 15. Juli 1998 (1998-07-15), Seiten 1117-1119, XP002290715 ISSN: 0146-9592 Seite 1117, linke Spalte Seite 1118, rechte Spalte Seite 1119	1-14
T	TAUSER F, ADLER F, LEITENSTORFER A: "Widely tunable sub-30-fs pulses from a compact erbium-doped fiber source" OPTICS LETTERS, Bd. 29, Nr. 5, 1. März 2004 (2004-03-01), Seiten 516-518, XP002290716 das ganze Dokument	1-14